Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (77-96)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Calculation of Surface Radiation Entropy Generation by Developing a Net Radiation Method in an Inclined Enclosure with Natural Convection*

Research Article

Mehdi Fathipour[1], Ali Safavinejad[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80207.1151

1- Introduction

Today, the determination of entropy generation is important to enhance system performance because entropy generation is the measure of the destruction of a system's available work. Considerable research has been performed to explore the importance of entropy generation in a thermal system. Thermal radiation is an important factor in the thermodynamic analysis of many high-temperature systems, such as solar collectors, boilers, furnaces, and solar collectors, as well as heating and cooling systems of buildings. The analysis of entropy generation in the combined heat transfer of natural convection-surface radiation in thermal equipment can be understood in the sense that when thermal equipment has less irreversibility, less entropy is produced, which leads to higher efficiency. Numerical study of radiative entropy generation in the enclosure has not been performed using the net radiation method. Therefore, in this research, the entropy generation of surface radiation in an inclined enclosure with natural convection was investigated by a net radiation method. The governing equations are solved by the stream-vorticity function with the finite difference method and the surface radiation equations are solved with the net radiation method. Surface radiation entropy generation includes radiative entropy in the field and wall matter. In this method, by solving the spectral net radiation equations, the incoming and outgoing radiation intensity of surfaces is obtained. Next, the radiative entropy in the wall matter and the spectral radiative entropy intensity are calculated. Finally, the radiative field is calculated using spectral radiative entropy intensity. In order to validate the solution method, the radiative entropy generation rate in the enclosure is compared with the second law of thermodynamics. The results showed that the entropy generation rate of surface radiation by the developed net radiation method conformed to the second law of thermodynamics. The effects of Rayleigh number, emissivity, and enclosure angle on entropy generation are investigated.

2- Problem description

In this work, natural convection coupled with surface thermal radiation in a two-dimensional, inclined enclosure of length L is considered. The system is schematically shown in Fig. 1. The inclined enclosure is limited by two adiabatic regions below and above the horizontal adiabatic walls. The vertical wall is kept at a constant temperature $T_h > T_c$. The fluid flow is assumed to be laminar and at a steady state. The wall surfaces of the inclined enclosure were considered opaque, diffuse, and gray. Air is incompressible with Boussinesq approximation, with constant properties and Pr = 0.71.

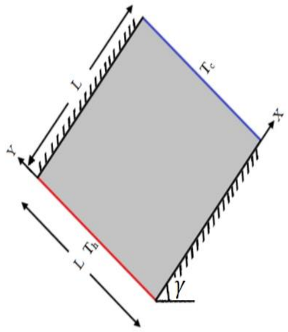


Fig. 1. Scheme of the physical model

Entropy generation of surface radiation in the enclosure. The absorption and emission of radiative entropy at opaque walls are very similar to that of radiation energy. Radiative entropy consists of radiation entropy in the field and in the wall matter.

The radiative entropy generation rate on the surface is generally defined as follows:

$$\dot{S}''_{gen,r}(r_w) = \frac{q_{in}-q_{out}}{T_w} - \left(\dot{S}''_{in} - \dot{S}''_{out}\right) \quad (1)$$

On the right side of the above equation, the first part expresses the entropy generation due to heat transfer, which constitutes the entropy in the wall matter, and the second part of the equation shows the entropy change on the surface, which constitutes the entropy in the radiative field.

A radiation beam carries energy, entropy, and exergy. The spectral radiative entropy intensity carried by a radiation beam with spectral radiative intensity I_λ is defined by Planck as:

---

*Manuscript received: December 23, 2022. Revised, June 7, 2023, Accepted, November 19, 2023.

[1] Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

[2] Corresponding author. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

Email: asafavi@birjand.ac.ir

$$L_\lambda = \frac{2k_B c}{\lambda^4}\left\{\left(1+\frac{I_\lambda \lambda^5}{2hc^2}\right) ln\left(1+\frac{I_\lambda \lambda^5}{2hc^2}\right) - \left(\frac{I_\lambda \lambda^5}{2hc^2}\right) ln\left(\frac{I_\lambda \lambda^5}{2hc^2}\right)\right\} \quad (2)$$

The spectral radiation intensity of the blackbody at temperature T is also expressed by Planck's law as follows:

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/k_B\lambda T}-1)} \quad (3)$$

The spectral entropy fluxes can be calculated by:

$$\dot{S}''_{\lambda,in}(r_w) = \int_{2\pi} L_\lambda(r_w,\hat{s})(n_w.\hat{s})\, d\Omega \quad (4)$$

$$\dot{S}''_{\lambda,out}(r_w) = \int_{2\pi} L_\lambda(r_w,\hat{s}')(n_w.\hat{s}')\, d\Omega \quad (5)$$

By definition, the local net increment of entropy flow in the wall matter under consideration after radiation processes is given by:

$$\dot{S}''_M(r_w) = -\frac{\pi}{T_w}\int_0^\infty \left(I_{\lambda,out} - I_{\lambda,in}\right) d\lambda \quad (6)$$

The local net increment of entropy flow in the radiative field at the opaque wall after radiation emission and reflection processes at the wall can be written as:

$$\dot{S}''_{r.f} = \int_0^\infty \left(\dot{S}''_{\lambda,out} - \dot{S}''_{\lambda,in}\right) d\lambda \quad (7)$$

By a combination of equations (6) and (7), the entropy generated on the wall surface at wavelength λ with wavelength interval dλ can be written as:

$$\dot{S}''_{gen,r} = \dot{S}''_M + \dot{S}''_{r.f} \quad (8)$$

3- Solution method

The governing equations are discretized in a uniform grid by the finite difference method. The second-order central difference scheme is used for discretizing the convective and diffusion terms. For discretizing the first derivate in boundary conditions, a second-order backward or forward difference scheme is used. The Poisson equation and energy equation are solved by the alternative direction implicit (ADI) method while the vorticity transfer equation is solved by the point successive under-relaxation (PSUR) method or Gauss-Seidel iteration method. It should be noted that in the non-conservative form of governing equations, accelerating in solving vorticity and energy transfer equations, such as utilizing ADI solver or successive over-relaxation coefficient, leads to divergence. In natural convection combined with surface radiation, initialization is performed, and the Poisson equation is solved by the ADI solver. Afterwards, the vorticity transfer equation is solved by PSUR, and the vorticity boundary condition is updated. The energy equation is solved by the ADI solver. Subsequently, the temperatures of boundary elements used in the net radiation method are obtained by solving the system of equations based on the surface radiation equation. Therefore, the net radiative heat flux of each surface element is calculated by the surface radiation equation and is used to update energy equation boundary conditions. This procedure is continued to satisfy convergence criteria. Entropy generation of surface radiation in the enclosure includes entropy generation in the radiative field and in the wall matter, which are calculated by solving equations (6) and (7), respectively. Radiation is defined as a part of the electromagnetic spectrum, which includes visible radiation and a part of infrared and ultraviolet radiation. Therefore, by integrating the spectral entropy flux in the wavelength range of 0.1-100 micrometers, the surface radiation entropy rate is calculated.

4- Results

Effect of surface radiation on entropy generation. Table 1 shows the entropy generation rate of surface radiation in an inclined enclosure and different emissivity and Ra = 10^5. By an increase in emissivity, the surface radiation entropy generation increases. At least 31% of the total entropy generation at ε=0.1 and a maximum of 85% of the total entropy generation at ε=1 belong to the entropy generation due to surface radiation. A rise in emissivity results in a slightly decreased entropy generation rate due to heat transfer and fluid friction and an extremely increased entropy generation rate due to surface radiation. Moreover, the percentage of entropy generation due to surface radiation augments so that the majority of entropy generation is caused by surface radiation. Therefore, surface radiation cannot be neglected in the analysis of this type of system.

Table 1. Effect of emissivity on entropy generation

ε	Entropy Generation				
	Heat transfer	Fluid friction	Surface radiation	Total entropy	$\frac{\text{Surface radiation}}{\text{Total entropy}}$ %
0.1	3.8791	0.2412	1.8588	5.6775	31%
0.2	3.8394	0.2401	3.7466	7.8261	48%
0.5	3.7323	0.2371	9.7485	13.7179	71%
0.8	3.6429	0.2344	16.621	20.4979	81%
1.0	3.5931	0.2329	21.966	25.7920	85%

5- Conclusion

In this study, the analysis of conjugate natural convection with surface radiation in a two-dimensional enclosure was evaluated for surface radiation entropy generation. The results showed that the presence of surface radiation in the enclosure causes asymmetry in entropy generation due to heat transfer and fluid friction. By increasing emissivity, the entropy generation rate due to heat transfer decreases, and the entropy generation rate due to surface radiation increases. The maximum entropy generation rate of surface radiation is concentrated on the cold wall. With a rise in Ra, the entropy generation in the enclosure increases. By augmented emissivity, the entropy generation rate due to surface radiation rises. The lowest radiation entropy generation rate occurs on the upper adiabatic wall and the maximum radiation entropy generation rate occurs on the cold wall. The findings revealed that the surface radiation entropy generation declines with an increased enclosure angle. The minimum entropy generation occurs at 90 degrees. In general, in this study, with the developed net radiation method, the effect of surface radiation on entropy generation was investigated, and it was observed that the entropy generation due to surface radiation was 85% of the total entropy generation rate in the enclosure. Furthermore, we found that the entropy generation due to the effect of surface radiation increased by 520% compared to when surface radiation was ignored. It could be concluded that the entropy generation due to surface radiation is very significant in the enclosure and it is impossible to ignore surface radiation in the problems of natural convection-surface radiation heat transfer.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۵، ۱، ۱۴۰۳. (۹۶-۷۷)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

محاسبه تولید انتروپی تابش سطحی با توسعه روش تابش خالص در محفظه‌ای مایل همراه با جابه‌جایی طبیعی*

مقاله پژوهشی

مهدی فتحی پور(۱)   علی صفوی نژاد(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80207.1151

چکیده در این مقاله با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه‌ای مایل همراه با جابه‌جایی طبیعی تحلیل و بررسی شده است. معادلات حاکم با فرمول‌بندی تابع جریان- ورتیسیتی با روش تفاضل محدود و معادلات تابش سطحی با روش تابش خالص طیفی حل می‌گردند. تولید انتروپی تابش سطحی، شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده است. در این روش، با حل معادلات تابش خالص به صورت طیفی، شدت تابش ورودی و خروجی از سطوح به دست می‌آید. آنگاه، انتروپی تابشی در ماده و شدت انتروپی تابشی طیفی محاسبه و در پایان با استفاده از شدت انتروپی تابشی طیفی، انتروپی تابشی در میدان محاسبه می‌گردد. به منظور صحت محاسبه تولید انتروپی تابش سطحی، روش تابش خالص توسعه داده با قانون دوم ترمودینامیک، اعتبارسنجی شده است. تأثیر عدد رایلی، ضریب صدور و زاویه محفظه بر تولید انتروپی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه محفظه تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین تولید انتروپی در زاویه۹۰ درجه، حالتی که دیواره گرم دیواره پایینی محفظه باشد، اتفاق می‌افتد. همچنین ۸۵٪ تولید انتروپی کل ناشی از تابش سطحی می‌باشد به طوری که تولید انتروپی ناشی از تأثیر تابش سطحی، ۵۲۰٪ نسبت به حالتی که از تابش سطحی چشم‌پوشی می‌گردد، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی انتروپی تابش سطحی،؛ روش تابش خالص توسعه یافته، محفظه‌ای مایل.

Calculation of Surface Radiation Entropy Generation by Developing the Net Radiation Method in an Inclined Enclosure with Natural Convection

Mehdi Fathipour   Ali Safavinejad

Abstract *In this article, by developing the net radiation method, the entropy generation of surface radiation in an inclined enclosure with natural convection has been investigated. The governing equations are solved by the stream-vorticity function with the finite difference method and the surface radiation equations are solved with the net spectral radiation method. Surface radiation entropy generation includes radiation entropy in the field and in the matter. In this method, by solving the equations of net radiation in a spectral form, the intensity of the incoming and outgoing radiation from the surfaces is obtained, then the radiation entropy in the matter and the intensity of the spectral radiation entropy are calculated, and finally, the radiation entropy in the field is calculated using the intensity of the spectral radiation entropy. In order to accurately calculate the entropy generation of surface radiation, the developed net radiation method has been validated with the second law of thermodynamics. The effect of Rayleigh number, emissivity and enclosure angle on entropy generation is investigated. The results show that the surface radiation entropy generation decreases with the increase of the enclosure angle. The lowest entropy generation occurs at an angle of 90 degrees, when the hot wall is the lower wall of the enclosure. Also, 85% of the total entropy generation is due to surface radiation. So that the entropy generation due to the effect of surface radiation increases by 520% compared to the case where surface radiation is ignored.*

Keywords: surface radiation entropy; developed net radiation method; An inclined enclosure

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

Email: asafavi@birjand.ac.ir

مقدمه

امروزه تعیین تولید انتروپی برای افزایش کارایی سیستم‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در واقع، تحلیل تولید انتروپی امکان شناسایی علت‌های ناکارامدی سیستم‌ها را فراهم می‌کند. افزایش کارایی سیستم‌های حرارتی دما بالا همیشه مورد بحث و بررسی دانشمندان بوده است. انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی در محفظه‌ها به دلیل اهمیت آن در کاربردهای زیادی از جمله بویلرها، کوره‌ها، کلکتورهای خورشیدی و سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها استفاده می‌گردد. تحلیل تولید انتروپی در انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی در تجهیزات حرارتی از این لحاظ قابل درک می‌باشد که وقتی تجهیزات بازگشت‌ناپذیری کمتری داشته باشند، انتروپی کمتری نیز تولید می‌شود که منجر به راندمان بالاتر می‌گردد، بنابراین این امکان فراهم می‌شود که با استفاده از حداقل کردن تولید انتروپی در این تجهیزات، راندمان آن‌ها افزایش می‌یابد [1].

انتقال حرارت و اصطکاک دو عامل اصلی هستند که باعث بازگشت‌ناپذیری در فرایندها می‌شوند. این دو عامل در کنار هم باعث تولید انتروپی می‌شوند، بنابراین لازم است سهم تولید انتروپی در اثر انتقال حرارت و یا اصطکاک جریان سیال به طور جداگانه مشخص گردد تا برای بهبود راندمان سیستم و یا طراحی بهینه آن تصمیمات درستی اتخاذ گردد. برای مدل‌سازی دستگاه‌های حرارتی دما بالا، علاوه بر انتقال حرارت جابه‌جایی، انتقال حرارت تابشی نیز باید در نظر گرفته شود و صرف نظر کردن از آن باعث ایجاد خطاهای قابل ملاحظه‌ای می‌گردد.

بالاجی و ونکاتشان [2] اثر تابش سطحی بر جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربع شکل را بررسی کردند و نشان دادند که نتایج این تحقیق به واقعیت نزدیک‌تر است و دلیل آن عدم وجود سطوحی با ضریب صدور صفر در واقعیت می‌باشد. آکیاما و چانگ [3] تحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی در یک محفظه مربعی را بررسی کردند و نشان دادند که تابش، اگر چه تأثیر کمی بر عدد ناسلت انتقال حرارت جابه‌جایی دارد ولی بخش مهمی از شار حرارتی کلی و عدد ناسلت کلی را تشکیل می‌دهد. اگر چه مطالعات زیادی در حوزه انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی انجام شده ولی مطالعات اخیر به سمت تولید انتروپی در محفظه‌ها پیش رفته که در ادامه بیان می‌گردد.

ازتاپ و السالم [1] خلاصه‌ای از مطالعات در حوزه تولید انتروپی سیستم‌های حرارتی در محفظه‌های مختلف را ارائه کردند. خلاصه مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک، افزایش می‌یابد. شوجا و همکاران [4] تولید انتروپی جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربعی با جسم گرم را برای شبیه‌سازی خنک کننده تجهیزات میکرو الکترونیکی حل کردند و تأثیر سیال عامل هوا و آب را مقایسه و دریافتند که انتروپی هوا در مقایسه با آب مقدار بیشتری می‌باشد به طوری که جسم جامد گرم شده در شرایط شبیه‌سازی نشان داده، گرمای بیشتری را در هوا از دست می‌دهد. ابری و همکاران [5] تولید انتروپی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی آرام در یک محفظه مربعی را به صورت عددی بررسی و اثر گرمایش قسمتی از دیواره را بر تولید انتروپی مورد مطالعه قرار دادند و تغییرات عدد رایلی و پرانتل را بر تولید انتروپی بررسی کردند.

ارول و همکاران [6] تولید انتروپی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و جریان سیال را در داخل محفظه‌ای با دیواره ضخیم جامد بررسی و نشان دادند که تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت نسبت به برگشت‌ناپذیری جریان سیال برای کلیه مقادیر ضخامت دیواره‌های جامد قابل توجه‌تر است و تأثیر ضخامت دیواره گرم بر تولید انتروپی نسبت به ضخامت دیواره سرد چشمگیرتر است و با کاهش ضخامت دیواره سرد، انتقال حرارت کاهش می‌یابد. آیلیس و همکاران [7] تأثیر نسبت ابعادی یک محفظه مستطیلی بر تولید انتروپی را بررسی و دریافتند که تولید انتروپی کل در یک محفظه با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد، اگرچه افزایش نرخ تولید انتروپی به نسبت ابعاد محفظه بستگی دارد. برای عدد رایلی یکسان، تولید انتروپی کل برای یک محفظه بلند کمتر از یک محفظه کوتاه‌تر می‌باشد. اولیوسکی و همکاران [8] تولید انتروپی در یک حفره مستطیلی بسته با جابه‌جایی طبیعی را بررسی کردند و تأثیر نسبت ابعادی و نسبت برگشت‌ناپذیری گرمایی به لزجی را بر تولید انتروپی ارزیابی کردند.

علی پناه و همکاران [9] تحلیل تولید انتروپی در انتقال حرارت طبیعی با سیال تراکم‌پذیر هوا در یک حفره مربع، با توجه به رویکرد بوزینسک انجام دادند. در این مطالعه، تولید انتروپی در انتقال حرارت طبیعی تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر با خواص متغیر با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک به صورت

عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که انتروپی تولید شده برای جریان تراکم‌پذیر همیشه بیشتر از جریان تراکم‌ناپذیر است. همچنین با افزایش عدد رایلی، اختلاف بین جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر کاهش می‌یابد. بوعبید و همکاران [10] تأثیر عدد گراشف حرارتی، زاویه، نسبت توزیع برگشت‌ناپذیری و نسبت ابعادی حفره بر تولید انتروپی در یک حفره مستطیلی شیب‌دار پر از هوا را بررسی کردند. بوندروا و همکاران [11] تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی آرام نانوسیال مس در یک محفظه مثلثی باز که به‌طور جزئی تحت گرمایش قرار گرفته، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر عدد رایلی و موقعیت منبع حرارتی محلی را بر روی خطوط جریان، خطوط دما ثابت و تولید انتروپی محلی بررسی کردند. چو [12] تحلیل عددی در مورد اثر انتقال حرارت و تولید انتروپی جریان جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه موجی شکل پر شده با نانوسیال مس- آب انجام داد. ایشان اثرات پارامترهای جریان و شرایط هندسی دیواره موجی را بر عدد ناسلت، نرخ تولید انتروپی بررسی کردند و نشان دادند تولید انتروپی کل با افزایش دامنه سطح موجی افزایش می‌یابد.

سیدی و همکاران [13] تحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و تولید انتروپی در حضور میدان مغناطیسی در یک محفظه مایل مربعی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد حرارتی محفظه، از معیار جدید ضریب عملکرد اکولوژیکی استفاده شده است و تأثیر عدد هارتمن، زاویه محفظه و عدد رایلی بر تولید انتروپی، عدد ناسلت و ضریب عملکرد اکولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته شده است. افتخار و همکاران [14] تجزیه و تحلیل تولید انتروپی ناشی از جریان جابه‌جایی هیدرومغناطیسی را در داخل حفره مربعی پر از سیال غیرنیوتنی انجام دادند و حداقل تولید انتروپی در این مطالعه گزارش گردید. در ادامه به مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی پرداخته می‌شود.

امراکویی و همکاران [15] تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی و تابش سطحی را در کلکتور خورشیدی بررسی کردند و تأثیر غلظت‌های مختلف، دماهای ورودی و نرخ‌های جریان را بر تولید انتروپی بررسی کردند و نشان دادند که یک نرخ جریان بهینه وجود دارد که در آن انتروپی تولید شده برای هر ترکیبی از نسبت غلظت و دمای ورودی، حداقل است. دشتی و صفوی‌نژاد [16] تجزیه و تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی در یک محفظه دو بعدی را انجام و با رویکرد کمینه‌سازی تولید انتروپی، محل بهینه منبع گرمایی در محفظه را به دست آوردند. هینوجوسا و همکاران [17] اثر تابش سطحی بر تولید انتروپی در حفره‌ای باز تحت انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بررسی کردند و نشان دادند که تبادل تابشی باعث ایجاد تغییرات چشمگیری در میزان تولید انتروپی می‌گردد و نمی‌توان از آن صرف نظر کرد. آن‌ها اثر تابش سطحی را روی میدان دما و سرعت به دست آورده‌اند به عبارتی تولید انتروپی ناشی از هدایت و اصطکاک سیال محاسبه شده و تولید انتروپی روی سطوح ناشی از تابش سطحی محاسبه نشده است.

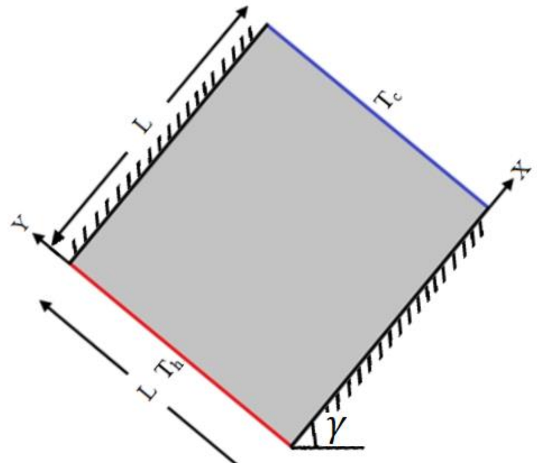
بر اساس اطلاعات نویسندگان تا کنون محاسبه تولید انتروپی تابشی در محفظه با روش تابش خالص انجام نشده است، بنابراین در این پژوهش با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی که شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده می‌باشد، محاسبه می‌گردد، چرا که بدون در نظر گرفتن تولید انتروپی تابش سطحی، محاسبات تولید انتروپی دقیق نمی‌باشد. در روش تابش خالص توسعه داده شده، با حل معادلات تابش خالص به صورت طیفی، شدت تابش ورودی و خروجی محاسبه می‌گردد که با استفاده از آن، انتروپی تابشی در ماده (دیواره) و شدت انتروپی تابشی طیفی محاسبه می‌گردد آنگاه با استفاده از شدت انتروپی تابشی، انتروپی تابشی در میدان محاسبه می‌گردد. از مجموع انتروپی تابشی در میدان و در ماده، انتروپی تابش سطحی به دست می‌آید.

جهت بررسی دقت و صحت حل معادلات تولید انتروپی تابشی، نرخ تولید انتروپی تابشی محاسبه شده در محفظه، با قانون دوم ترمودینامیک اعتبارسنجی می‌گردد. در این مطالعه تأثیر تابش سطحی، زاویه محفظه و ضریب صدور بر تولید انتروپی بررسی و توزیع تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه محاسبه می‌گردد و جهت حل معادلات مومنتوم و انرژی هم از روش تابع جریان- ورتیسیتی استفاده شده است.

تعریف مسئله و معادلات حاکم

در این مقاله، یک محفظه مایل مطابق شکل (۱) با دیواره گرم در دمای T_h ($۴۰۰ < T_h < ۱۰۰۰$)، دیواره سرد با دمای ثابت

Tc=۳۰۰K و بقیه دیواره‌های محفظه آدیاباتیک می‌باشند. جریان در محفظه پایا، آرام و دوبعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخشی و خاکستری است و هوا به عنوان سیال عامل و تراکم‌ناپذیر با تقریب بوزینسک، با خصوصیات ثابت و پرانتل ۰/۷۱ می‌باشد.



شکل ۱ مدل فیزیکی محفظه مایل با شرایط مرزی

معادلات حاکم. معادلات حاکم بر مسئله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب به شرح زیر می‌باشد [19]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\vartheta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+ g\beta_T(T-T_c)\sin\gamma \qquad (۲)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\vartheta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+ g\beta_T(T-T_c)\cos\gamma \qquad (۳)$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\left(\frac{k_f}{\rho c_p}\right)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (۴)$$

تابع جریان (ψ) و ورتیسیتی (ω) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\omega=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\ ,\ u=\frac{\partial \psi}{\partial y}\ ,\ v=-\frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad (۵)$$

همچنین متغیرها و پارامترهای بدون بعد در این تحقیق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$X=\frac{x}{L}\ ,\ Y=\frac{y}{L}\ ,\ \theta=\frac{T-T_c}{T_H-T_c}\ ,\varphi=\frac{T_H-T_c}{T_c}\ ,\Omega=\frac{\omega L^2}{\alpha}\ ,\Psi=\frac{\psi}{\alpha} \qquad (۶)$$

روش تابع جریان- ورتیسیتی برای حذف عبارت فشار در معادلات مومنتوم استفاده می‌شود. بنابراین، با استفاده از تابع جریان- ورتیسیتی، معادلات (۱) الی (۴) به صورت شکل‌های بدون بعد زیر می‌گردند:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2}=-\Omega \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\frac{\partial\Omega}{\partial X}-\frac{\partial\Psi}{\partial X}\frac{\partial\Omega}{\partial Y}=Pr\left(\frac{\partial^2\Omega}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Omega}{\partial Y^2}\right)+ Ra\,\Pr\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\cos\gamma-\frac{\partial\theta}{\partial Y}\sin\gamma\right) \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\frac{\partial\theta}{\partial X}-\frac{\partial\Psi}{\partial X}\frac{\partial\theta}{\partial Y}=\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right) \qquad (۹)$$

معادلات فوق تحت شرایط مرزی زیر قرار دارند:

$$\begin{aligned}
&\Psi=0,\ \frac{\partial\Psi}{\partial X}=0,\Omega=-\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} && Y=0\ ,1\\
&\Psi=0,\ \frac{\partial\Psi}{\partial Y}=0,\Omega=-\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} && X=0\ ,1\\
&\theta=1 && X=0\\
&\theta=0 && X=1\\
&-\frac{\partial\theta}{\partial Y}+N_rQ_r=0 && Y=0\\
&\frac{\partial\theta}{\partial Y}+N_rQ_r=0 && Y=1
\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که $N_r=\sigma T_c^4\left(\frac{L}{k_f\Delta T}\right)$ پارامتر بدون بعد تابش-رسانش و $Q_r=\frac{q_r}{\sigma T_c^4}$ پارامتر بدون بعد شار تابشی خالص می‌باشد.

$$Pr=\frac{\vartheta}{\alpha}\ ,\ Ra=\frac{g\beta_T(T-T_c)L^3}{v\alpha} \qquad (۱۱)$$

عدد ناسلت متوسط جابه‌جایی و تابشی برای سطح منبع حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شوند [20]:

$$\begin{aligned}
Nu_{ave,c}&=-\int_0^1\frac{\partial\theta}{\partial X}dY\\
Nu_{ave,r}&=\int_0^1 N_rQ_r dY
\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

معادلات تابش سطحی. جهت تبادل تابشی بین دیواره‌های محفظه از روش تابش خالص استفاده می‌گردد که به صورت معادله زیر بیان می‌گردد[21]:

$$\sum_{j=1}^{N}\left(\delta_{kj}-(1-\epsilon_k)\mathrm{F}_{kj}\right)J_j = \epsilon_k \sigma T_k^4 \qquad (۱۳)$$

که ϵ_k ضریب صدور سطح محفظه و J_j شار تابشی خروجی توسط سطح j ام است. N تعداد المان روی دیواره‌های محفظه، F_{kj} ضریب دید بین المان k و j است که از روش نخ‌های متقاطع هاتل به دست می‌آید و δ، دلتای کرونکر است. از معادله ماتریسی AX=B (X همان شار تابشی J_j مجهول می‌باشد) برای حل معادله (۱۳) استفاده می‌گردد و شار تابشی خروجی به دست می‌آید. پس از محاسبه شار تابشی خروجی، از معادله (۱۴) جهت محاسبه شار تابشی ورودی استفاده می‌گردد:

$$\mathrm{G_k} = \sum_{j=1}^{N} \mathrm{F_{kj}J_j} \qquad (۱۴)$$

شار تابش خالص q_k هر المان هم از معادله (۱۵) به دست می‌آید:

$$q_k = J_k - G_k \qquad (۱۵)$$

معادلات تولید انتروپی

جهت محاسبه تولید انتروپی بایستی عوامل بازگشت‌ناپذیری سیستم را پیدا کرده سپس معادلات تولید انتروپی هر عامل بازگشت‌ناپذیری را به دست آورد. در یک محفظه با انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی، تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال، ناشی از اصطکاک جریان سیال و ناشی از انتقال حرارت تابش سطحی می‌باشد.

تولید انتروپی انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال. نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و ناشی از اصطکاک جریان سیال برای یک جریان دو بعدی به ترتیب به صورت زیر بیان می‌گردد [22]:

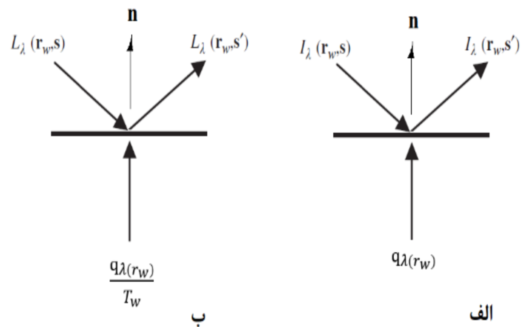
$$\dot{\mathrm{S}}'''_{gen,c} = \frac{k_f}{\mathrm{T}^2}\left[\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\right)^2\right] \qquad (۱۶)$$

$$\dot{\mathrm{S}}'''_{gen,f} = \frac{\mu}{\mathrm{T}}\left[2\left(\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}\right)^2\right) + \left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}}\right)^2\right] \qquad (۱۷)$$

تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه. یک پرتو تابشی نه تنها انرژی بلکه انتروپی هم حمل می‌کند. شکل (۲) نشان می‌دهد، جذب و انتشار انتروپی تابشی در دیواره بسیار شبیه انرژی تابشی است. انتروپی تابشی از انتروپی تابشی در میدان و در ماده (دیواره) تشکیل شده است.

نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی سطح به صورت کلی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{S}''_{gen,r}(r_w) = \frac{q_{in}-q_{out}}{T_w} - \left(\dot{S}''_{in} - \dot{S}''_{out}\right) \qquad (۱۸)$$



شکل ۲ الف) انتقال انرژی تابشی، ب) انتقال انتروپی تابشی روی سطح

در سمت راست معادله فوق، بخش اول تولید انتروپی در اثر انتقال حرارت را بیان می‌کند که انتروپی در ماده را تشکیل می‌دهد و بخش دوم معادله، تغییر انتروپی بر روی سطح را نشان می‌دهد که انتروپی تابشی در میدان را تشکیل می‌دهد.

با در نظر گرفتن یک سطح دیفرانسیلی dA، نرخ انتروپی طیفی برخوردی به سطح با انتگرال‌گیری از شدت انتروپی تابشی بر روی همه جهت‌ها، ۲π به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\dot{S}''_{\lambda,in}(r_w) = \int_{2\pi} L_\lambda(r_w,\hat{s})(n_w.\hat{s})\,d\Omega \qquad (۱۹)$$

شدت انتروپی تابشی طیفی که توسط یک پرتو تابشی حمل می‌شود توسط پلانک به صورت معادله زیر تعریف شده است:

$$\mathrm{L}_\lambda = \frac{2k_B c}{\lambda^4}\left\{\left(1+\frac{\mathrm{I}_\lambda\lambda^5}{2\mathrm{hc}^2}\right)\ln\left(1+\frac{\mathrm{I}_\lambda\lambda^5}{2\mathrm{hc}^2}\right) - \left(\frac{\mathrm{I}_\lambda\lambda^5}{2\mathrm{hc}^2}\right)\ln\left(\frac{\mathrm{I}_\lambda\lambda^5}{2\mathrm{hc}^2}\right)\right\} \qquad (۲۰)$$

شدت تابش طیفی جسم سیاه هم توسط قانون پلانک به صورت زیر بیان می‌گردد [23]:

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5\left(e^{hc/k_B\lambda T}-1\right)} \qquad (۲۱)$$

که c سرعت نور در خلأ ، h ثابت پلانک و k_B ثابت بولتزمن است.
مشابه معادله (۱۹) شار انتروپی طیفی خارج شده از سطح از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{S}''_{\lambda,out}(r_w) = \int_{2\pi} L_\lambda(r_w, \hat{s}')(n_w.\hat{s}')\, d\Omega \quad (۲۲)$$

با ترکیب معادلات (۱۹) و (۲۲) برای تغییر خالص انتروپی محلی در میدان تابشی و بر روی سطح کدر به دلیل فرایند صدور و بازتابش، شار انتروپی در میدان تابشی (Radiative Field) با استفاده از شدت انتروپی تابشی طیفی به صورت زیر محاسبه می‌گردد [24]:

$$\dot{S}''_{\lambda,r.f}(r_w) = \dot{S}''_{\lambda,out}(r_w) - \dot{S}''_{\lambda,in}(r_w) = \int_{4\pi} L_\lambda(r_w, \hat{s})(n_w.\hat{s})\, d\Omega \quad (۲۳)$$

که برای سطوح پخشی، شار انتروپی خروجی و ورودی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\dot{S}''_{out}(r_w) = \pi \int_0^\infty L_{\lambda,out}\, d\lambda \quad (۲۴)$$

$$\dot{S}''_{in}(r_w) = \pi \int_0^\infty L_{\lambda,in}\, d\lambda \quad (۲۵)$$

به واسطه تابش، انرژی سطح کدر به دلیل فرایند جذب–صدور تغییر می‌کند. تغییر انتروپی محلی در سطح کدر که تحت تأثیر فرایند تابش قرار دارد که انتروپی تابشی طیفی در ماده (matter) را تشکیل می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{S}''_{\lambda,M}(r_w) = -\frac{q''_{r,\lambda}(r_w)}{T_w} = -\frac{1}{T_w}\int_{4\pi} I_\lambda(r_w, \hat{s})(n_w.\hat{s})\, d\Omega \quad (۲۶)$$

نرخ انتروپی تابشی در میدان هم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{S}''_{r.f} = \int_0^\infty (\dot{S}''_{\lambda,out} - \dot{S}''_{\lambda,in})\, d\lambda \quad (۲۷)$$

در اثر تابش، دیواره با جذب و انتشار تابش، حرارت دریافت یا صادر می‌کند. طبق تعریف، نرخ انتروپی تابشی در ماده برای سطوح پخشی هم از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{S}''_M(r_w) = -\frac{\pi}{T_w}\int_0^\infty (I_{\lambda,out} - I_{\lambda,in})\, d\lambda \quad (۲۸)$$

که جهت محاسبه انتروپی تابشی در ماده، ابتدا شار تابش خروجی از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sum_{j=1}^{N} \left(\delta_{kj} - (1-\epsilon_k)F_{kj}\right) J_{j,\lambda} = \pi \epsilon_k I_{k,\lambda,b} \quad (۲۹)$$

سپس شار تابشی طیفی ورودی هم با استفاده از شار تابشی طیفی خروجی از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$G_{k,\lambda} = \sum_{j=1}^{N} F_{kj} J_{j,\lambda} \quad (۳۰)$$

پس از محاسبه شار تابشی طیفی ورودی و خروجی، با استفاده از معادلات (۲۹) و (۳۰)، شدت تابشی طیفی ورودی و خروجی به دست می‌آید:

$$I_{k,\lambda,in} = G_{k,\lambda}/\pi \quad (۳۱)$$

$$I_{k,\lambda,out} = J_{k,\lambda}/\pi \quad (۳۲)$$

سپس با جای‌گذاری در معادله (۲۸)، نرخ انتروپی تابشی در ماده به دست می‌آید.

اما جهت محاسبه نرخ انتروپی تابشی در میدان، ابتدا شدت انتروپی تابشی طیفی از معادلات (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌گردد:

$$L_{k,\lambda,out} = \frac{2k_B c}{\lambda^4}\left\{\left(1+\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2}\right)\ln\left(1+\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2}\right) - \left(\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2}\right)\ln\left(\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2}\right)\right\} \quad (۳۳)$$

$$L_{k,\lambda,in} = \sum_{j=1}^{N} F_{kj}\, L_{j,\lambda,out} \quad (۳۴)$$

آنگاه با جای‌گذاری معادلات فوق در معادلات (۲۴) و (۲۵)، شار انتروپی خروجی و ورودی به دست می‌آید و در نهایت با جای‌گذاری در معادله (۲۷)، نرخ انتروپی تابشی در میدان به دست می‌آید. از مجموع نرخ انتروپی تابشی در ماده و در میدان، نرخ انتروپی تابش سطحی محاسبه می‌گردد.

$$\dot{S}''_{gen,r} = \dot{S}''_M + \dot{S}''_{r.f} \quad (۳۵)$$

با انتگرال‌گیری معادلات (۱۶)، (۱۷) و معادله (۳۵)، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت، اصطکاک سیال و تابش سطحی محاسبه می‌گردد:

$$\dot{S}_{gen,c} = \int_V \dot{S}'''_{gen,c}\, dV \quad (۳۶)$$

$$\dot{S}_{gen,f} = \int_V \dot{S}'''_{gen,f}\, dV \quad (۳۷)$$

$$\dot{S}_{gen,r} = \int_A \dot{S}''_{gen,r}\, dA \quad (۳۸)$$

از مجموع روابط (۳۶)، (۳۷) و (۳۸) نرخ تولید انتروپی کل در محفظه محاسبه می‌گردد:

$$\dot{S}_{\mathrm{gen}} = \dot{S}_{\mathrm{gen},c} + \dot{S}_{\mathrm{gen},f} + \dot{S}_{\mathrm{gen,r}} \quad (۳۹)$$

روش حل

معادلات حاکم با روش تفاضل محدود در یک شبکه مربعی یکنواخت گسسته می‌گردند که برای انفصال عبارت نفوذ از طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای انفصال عبارات جابه‌جایی نیز از طرح تفاضل مرکزی استفاده شده است [۲۵–۲۷]. معادله پواسون و معادله انرژی با روش ضمنی و معادله انتقال ورتیسیتی با روش فوق تخفیف متوالی نقطه به نقطه (Point Successive Over-Relaxation Method) یا روش تکرار گاوس سایدل (The Point Gauss-Seidel Iteration Method) حل شده است. در انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی توأم با تابش سطحی، ابتدا دمای سطوح آدیاباتیک در محفظه حدس زده می‌شود سپس با حل دستگاه معادلات (۱۳) و (۱۴)، شار تابش ورودی و خروجی و از معادله (۱۵) شار تابشی خالص هر المان محاسبه می‌گردد. شار تابشی خالص محاسبه شده در روش تابش خالص (Net Radiation Method) میزان شار تابشی بر وجه هر المان شبکه را نشان می‌دهد که برای هر گره در شرایط مرزی حل معادلات جریان، باید میانگین شار تابشی دو المان مجاور آن گره محاسبه گردد. با استفاده از شار تابشی خالص هر المان و شرایط مرزی، دمای سطوح را به‌هنگام کرده و معادله انرژی با دمای اصلاح شده سطوح، حل می‌گردد. این روند تا رسیدن به همگرایی با شرط توقف ادامه می‌یابد. با داشتن توزیع دما و سرعت در محفظه، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال از معادلات (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردد. اما تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه، شامل تولید انتروپی در میدان و در ماده است که نرخ تولید انتروپی تابشی در میدان از معادله (۲۷) و نرخ تولید انتروپی در ماده از معادله (۲۸) محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه تابش به صورت بخشی از طیف الکترومغناطیسی تعریف می‌شود که شامل تابش مرئی و بخشی از تابش مادون قرمز و ماورأ بنفش می‌باشد بنابراین با انتگرال‌گیری از تفاضل شار انتروپی طیفی ورودی و خروجی در محدوده طول موج ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومتر، نرخ انتروپی تابش سطحی در میدان و دیواره محاسبه می‌گردد.

استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

استقلال از شبکه. در حل جابه‌جایی طبیعی توأم با تابش سطحی، یک محفظه مطابق شکل (۱) با دیواره گرم در دمای ثابت T_h=۱۰۰۰K، دیواره سرد با دمای ثابت T_c=۳۰۰K و بقیه دیواره‌های محفظه آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. جریان در محفظه پایا و آرام و دوبعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخشی و خاکستری است. مطابق جدول (۱)، استقلال از شبکه برای محاسبه عدد ناسلت جابه‌جایی و ناسلت تابشی و نرخ انتروپی تابشی در رایلی $۱۰^۵$، ضریب صدور یک، زاویه محفظه ۳۰ درجه و نسبت دمای بی‌بعد ۲/۳۳ = φ در چهار شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی استقلال از شبکه نشان می‌دهد که خطای نسبی عدد ناسلت و نرخ انتروپی تابشی برای شبکه ۶۱x۶۱ نسبت به شبکه ۱۰۱x۱۰۱، به ترتیب کمتر از ۰/۰۴ و ۰/۳ درصد می‌باشد. بنابراین شبکه ۶۱x۶۱، به‌عنوان یک شبکه مناسب از نظر دقت عملکرد و زمان محاسبه در تمامی حل‌ها انتخاب گردید.

جدول ۱ مقادیر ناسلت جابه‌جایی، ناسلت تابشی و نرخ انتروپی تابشی با تغییرات شبکه

ابعاد شبکه	ناسلت جابه‌جایی	ناسلت تابشی	انتروپی تابش سطحی	زمان محاسبه (ثانیه)
۴۱×۴۱	۴/۴۵۵	۴/۵۳۰	۲۲/۲۴۴	۴۶
۶۱×۶۱	۴/۳۹۷	۴/۵۷۸	۲۲/۰۷۵	۷۰
۸۱×۸۱	۴/۳۷۵	۴/۶۰۲	۲۲/۰۴۰	۲۵۵
۱۰۱×۱۰۱	۴/۳۶۴	۴/۶۱۶	۲۲/۰۱	۳۸۷

اعتبارسنجی تولید انتروپی تابش سطحی. نرخ تولید انتروپی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک یک سیستم بسته در حالت پایا از معادله (۴۰) به دست می‌آید.

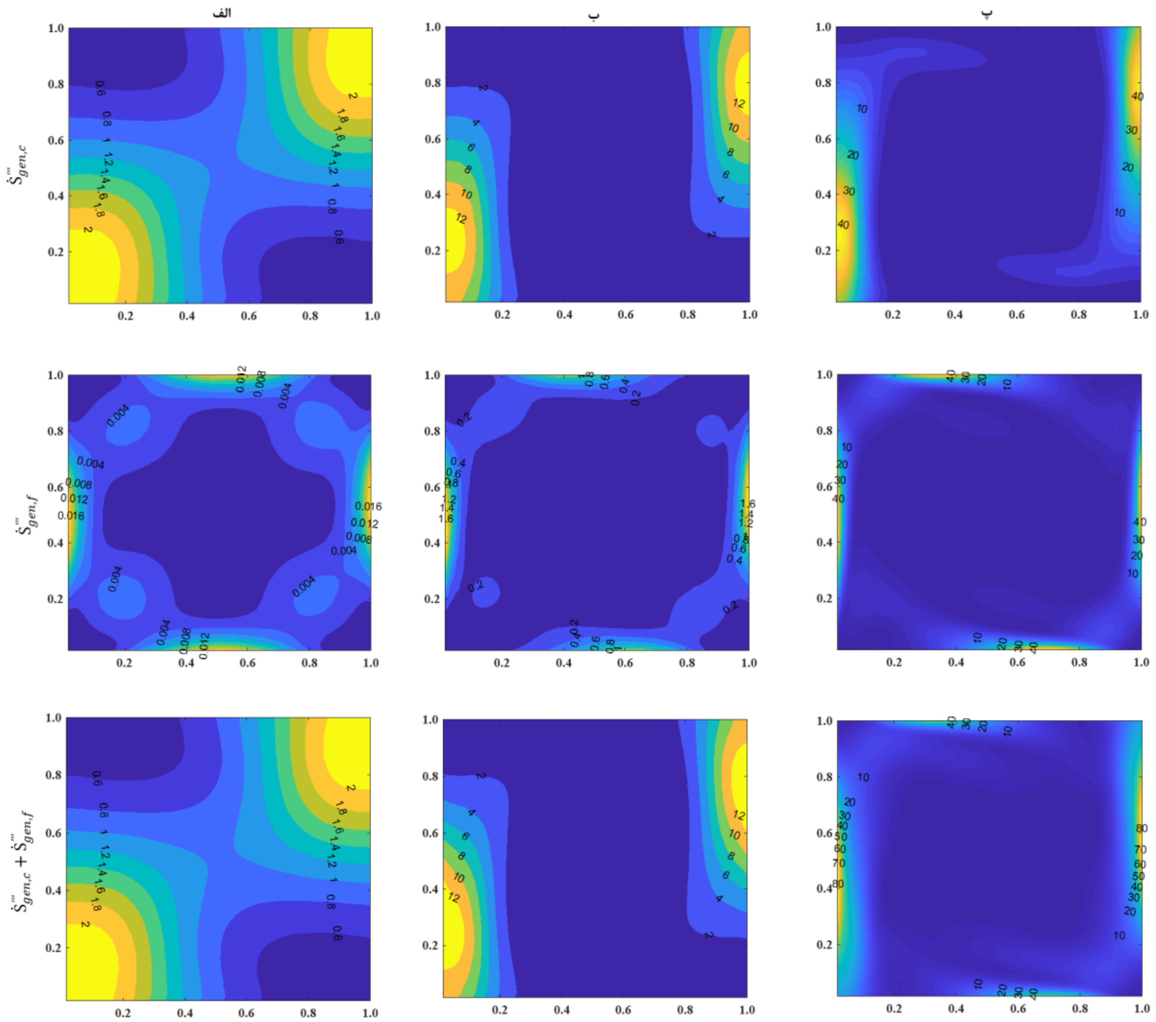
$$\dot{S}_{gen} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{\dot{Q}_i}{T_i} \quad (۴۰)$$

جهت اعتبارسنجی محاسبات انجام شده، یک محفظه با یک سطح گرم با دمای T_h =۱۰۰۰K (دیواره چپ) و سه سطح سرد با دمای T_c=۵۰۰K در نظر گرفته می‌شود. محفظه تحت تابش خالص می‌باشد و هر سطح محفظه به60 قسمت مساوی تقسیم شده است. جدول (۲)، نتایج نرخ تولید انتروپی تابش سطحی با روش تابش خالص و قانون دوم ترمودینامیک در

محفظه ذکر شده را در ضرایب صدور مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که نرخ تولید انتروپی تابش سطحی با روش تابش خالص و قانون دوم ترمودینامیک در ضرایب صدور مختلف از مطابقت بسیار بالایی برخوردار است که نشان از صحت عملکرد کد برنامه‌نویسی شده می‌باشد. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، نرخ انتروپی کل در محفظه محاسبه می‌شود در صورتی که با روش تابش خالص، انتروپی هر المان از سطح قابل محاسبه می‌باشد. با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی افزایش می‌یابد.

جدول ۲ نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه

ε	دیواره پایین	دیواره راست (دیواره سرد)	دیواره بالا	دیواره چپ (دیواره گرم)	روش عددی	بر اساس قانون دوم ترمودینامیک	درصد(٪) اختلاف
۰/۱	۰/۲۱۹۵	۰/۲۳۰۲	۰/۲۱۹۹	۰/۳۴۸۰	۱/۰۱۷۹	۱/۰۱۸	٪۰/۰۰۰۷
۰/۲	۰/۴۵۴۷	۰/۴۹۷۴	۰/۴۵۵۰	۰/۶۷۸۵	۲/۰۸۵۷	۲/۰۸۵۷	٪۰/۰۰۰۱
۰/۵	۱/۲۵۰۵	۱/۵۳۹۹	۱/۲۵۲۵	۱/۶۰۲۸	۵/۶۴۵۷	۵/۶۴۵۸	٪۰/۰۰۱
۰/۸	۲/۱۹۷۱	۲/۹۸۷۹	۲/۲۰۱۹	۲/۵۱۳۰	۹/۹۰۰۰	۹/۹۰۰۰	٪۰/۰۰۰۳
۱/۰	۲/۹۳۰۵	۴/۱۴۷۳	۲/۹۳۷۵	۳/۲۴۸۰	۱۳/۲۶۳۲	۱۳/۲۶۳۲	٪۱/۲۸۶$^{-۱۲}$



شکل ۳ تولید انتروپی بدون تابش در محفظه ۴۵ درجه، بی‌بعد $\varphi = ۲/۳۳$ و $\varepsilon = ۰$: الف) رایلی ۱۰^{۳}، ب) رایلی ۱۰^{۴}، پ) رایلی ۱۰^{۵}

بحث و نتایج

به‌منظور تجزیه و تحلیل تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی، مطابق شکل (۱) یک محفظه‌ای مایل با دو دیواره دما ثابت و دو دیواره آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. جریان در محفظه پایا و آرام و دو بعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخشی و خاکستری است. با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی محاسبه می‌گردد. سهم تابش سطحی از تولید انتروپی تابش در میدان و در ماده بررسی می‌شود. به‌طور کلی توجه ویژه‌ای به تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی شده است. عدد رایلی در محدوده 10^3 تا 10^5 و اختلاف دمای بدون بعد φ در محدوده ۰،۳۳ تا ۲/۳۳ می‌باشد.

تأثیر تابش سطحی بر تولید انتروپی. در ابتدا تأثیر تابش سطحی بر نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک به عبارتی تأثیر تابش سطحی در محاسبات را نسبت به عدم وجود تابش سطحی در عدد رایلی مختلف بررسی می‌گردد. در شکل (۳) تولید انتروپی جابه‌جایی طبیعی در محفظه مایل ۴۵ درجه، $\varphi =$ ۲/۳۳ و بدون حضور انتقال حرارت تابشی نشان داده شده است. با افزایش عدد رایلی، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک افزایش می‌یابد به طوری که روی دیواره‌های سرد و گرم بیشترین تولید انتروپی وجود دارد. تولید انتروپی بدون وجود تابش سطحی، به صورت منظم روی دیواره‌ها توزیع شده است. نیمه پایینی دیواره گرم و نیمه بالایی دیواره سرد بیشترین تولید انتروپی را دارد زیرا بیشترین اختلاف دما در دیواره سرد T_c، سمت بالا و دیواره گرم T_h، سمت پایین می‌باشد. نرخ تولید انتروپی با افزایش فاصله از دیواره گرم و سرد، کاهش می‌یابد. علاوه بر این انتقال حرارت هدایت سیال، مکانیزم غالب تولید انتروپی است و سیال به دلیل اختلاف دمای دو دیواره سرد و گرم به صورت ساعت‌گرد در چرخش است. در صورتی که تابش سطحی در نظر گرفته شود، نمودارهای نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک به صورت شکل (۴) می‌باشند. شکل‌ها نشان می‌دهند که دیواره سرد، بیشترین نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک در حضور تابش دارد. حضور تابش باعث عدم تقارن نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک در محفظه می‌گردد و بیشترین تولید انتروپی به سمت دیواره سرد T_c کشیده می‌شود زیرا بیشترین اختلاف دما در آنجا اتفاق می‌افتد.

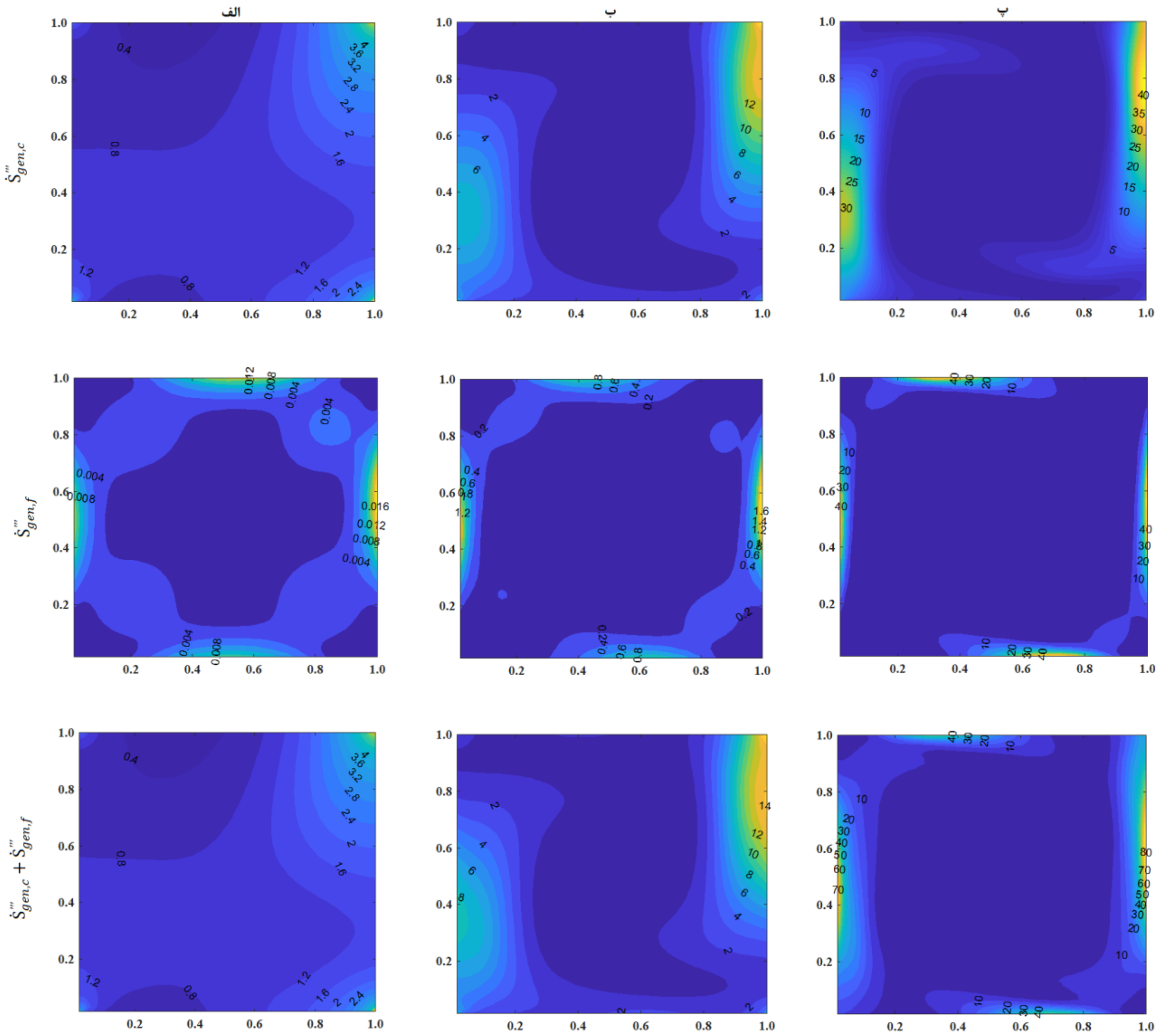
جدول (۳) تأثیر تابش سطحی بر نرخ تولید انتروپی در محفظه مایل ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. در حالتی که تابش سطحی در نظر گرفته شود، نرخ تولید انتروپی به میزان قابل توجهی بیشتر می‌گردد به طوری که حداکثر در رایلی ۱۰^۵ ، $\varphi =$ ۲/۳۳ و حداقل در رایلی ۱۰^۳ و $\varphi =$ ۰/۳۳ ترتیب ۲۵/۷۹ و ۰/۱۸۷ می‌باشد. بیشترین درصد اختلاف ۲۱۲۸٪ در رایلی۱۰^۳ و $\varphi =$ ۲/۳۳ و کمترین ۲۶٪ در رایلی ۱۰^۵ و بی‌بعد$\varphi =$ ۰/۳۳ می‌باشد. بنابراین تبادل تابشی سطحی نقش مهمی در نرخ تولید انتروپی در محفظه دارد. همچنین با افزایش عدد رایلی و دمای دیواره گرم، تولید انتروپی افزایش می‌یابد.

جدول (۴) نرخ تولید انتروپی در رایلی ۱۰^۵ همراه با تابش سطحی در محفظه‌ای مایل ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. حداقل ۲۶٪ از نرخ تولید انتروپی کل در ۰/۳۳

$\varphi =$ و حداکثر ۸۵٪ از نرخ تولید انتروپی کل در ۲/۳۳

$\varphi =$ ، متعلق به نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد. با افزایش دمای دیواره گرم، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و تابش سطحی افزایش و نرخ تولید انتروپی ناشی از اصطکاک سیال کاهش می‌یابد. در سیستم‌های انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی همراه با تابش سطحی در $\varphi >$ ۰/۳۳، انتقال حرارت تابش سطحی مکانیزم غالب تولید انتروپی می‌باشد.

تأثیر ضریب صدور بر تولید انتروپی تابش سطحی . شکل(۵) تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی روی دیواره‌های گرم و سرد محفظه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب صدور، شار حرارتی تابشی روی سطوح دیواره گرم و دیواره سرد افزایش می‌یابد، بنابراین با توجه به رابطه (۱۸) که شار حرارتی تابشی رابطه مستقیمی با نرخ تولید انتروپی تابشی دارد، پس با افزایش شار حرارتی تابشی، نرخ تولید انتروپی تابشی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی با نزدیک شدن به دیواره آدیاباتیک کاهش می‌یابد. علاوه بر این نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی دیواره سرد بیشتر از دیواره گرم می‌باشد.



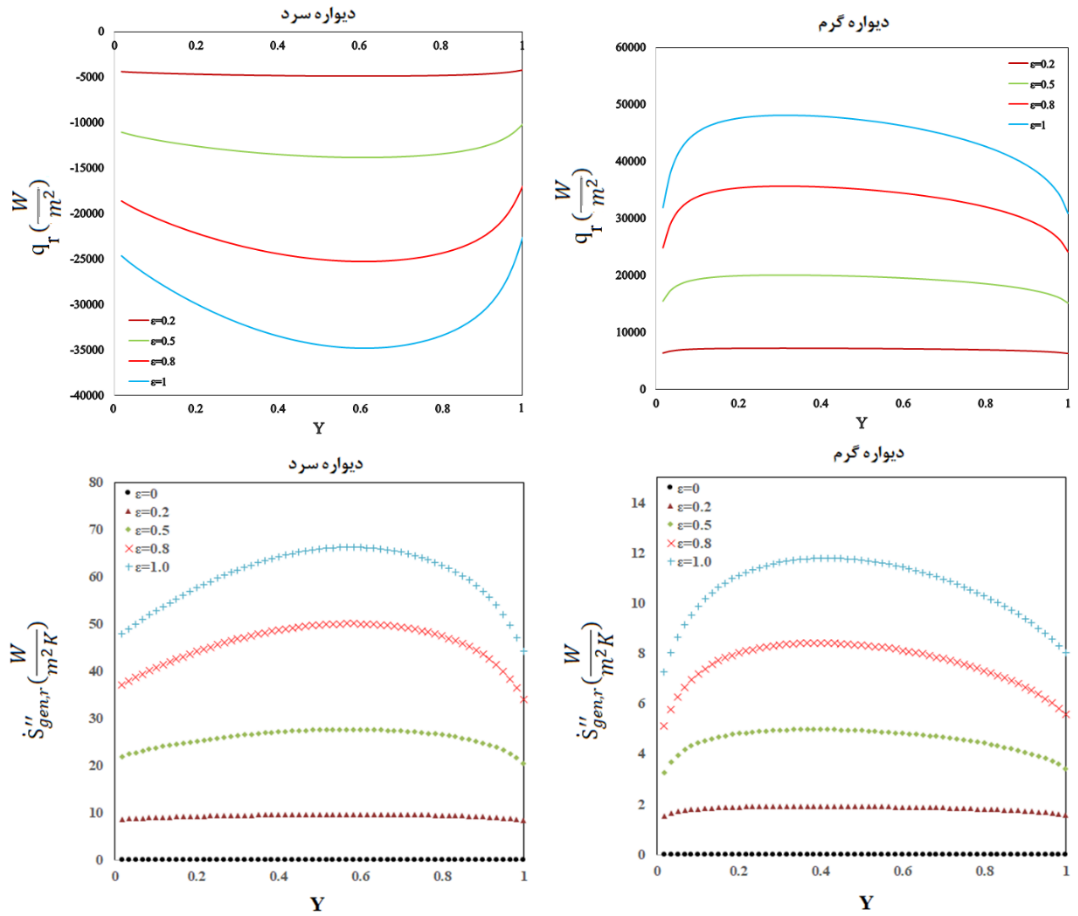
شکل ۴ نرخ تولید انتروپی با تابش در محفظه ۴۵ درجه در $\varphi = ۲/۳۳$ و $\varepsilon = ۱$: الف) رایلی ۱۰^۳، ب) رایلی ۱۰^۴، پ) رایلی ۱۰^۵

جدول ۳ نرخ تولید انتروپی کل در محفظه

φ	تولید انتروپی کل در محفظه								
	ε = ۰			ε = ۱			درصد اختلاف		
	Ra =۱۰^۳	Ra =۱۰^۴	Ra =۱۰^۵	Ra =۱۰^۳	Ra =۱۰^۴	Ra =۱۰^۵	Ra=۱۰^۳	Ra=۱۰^۴	Ra=۱۰^۵
۰/۳۳	۰/۰۴۰۲۹	۰/۱۰۴۶۱	۰/۴۵۴۸۱	۰/۱۸۷۰۴	۰/۲۳۸۹۶	۰/۵۷۲۹۵	٪۳۶۴	٪۱۲۸	٪۲۶
۱/۳۳	۰/۴۳۱۲۸	۰/۹۶۶۷۲	۱/۹۸۱۳	۴/۶۹۹۴۳	۵/۱۸۱۳۷	۶/۱۷۸۱۲	٪۹۹۰	٪۴۳۶	٪۲۱۲
۲/۳۳	۱/۰۰۵۶	۲/۲۱۴۳	۴/۱۶۳۲	۲۲/۰۰۴۹	۲۳/۷۲۷۸	۲۵/۷۹۱۹۸	٪۲۱۲۸	٪۹۷۲	٪۵۲۰

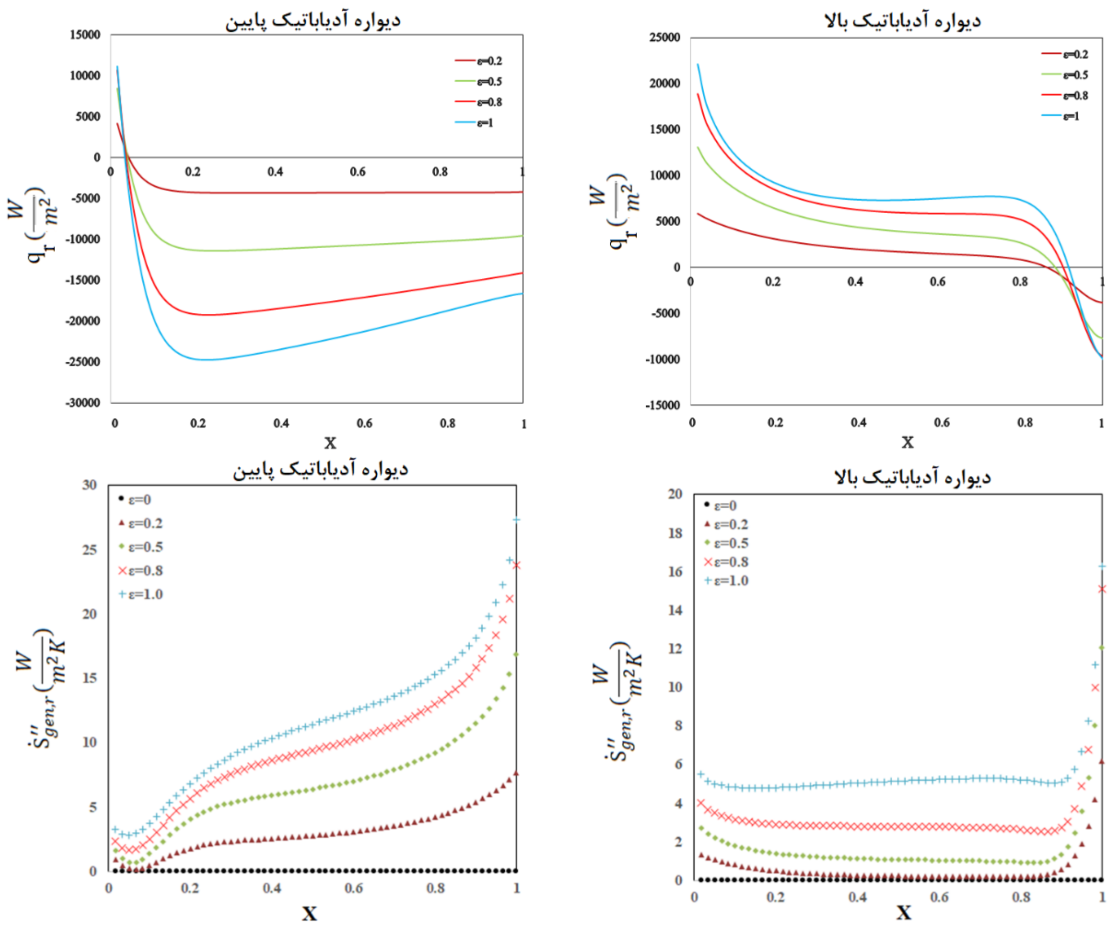
جدول ۴ تأثیر دمای دیواره گرم بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی

تولید انتروپی					
$Ra = ۱۰^{۵}$ ، $\varepsilon = ۱$					
% انتروپی تابش سطحی / انتروپی کل	انتروپی کل	تابش سطحی	اصطکاک سیال	انتقال حرارت هدایت	φ
٪ ۲۶/۶	۰/۵۷۲۹	۰/۱۵۲۳	۰/۲۷۹۶	۰/۱۴۱۰	۰/۳۳
٪ ۷۱/۱	۶/۱۷۸۱	۴/۳۹۰۱	۰/۲۵۲۲	۱/۵۳۵۸	۱/۳۳
٪ ۸۵/۲	۲۵/۷۹۲	۲۱/۹۶۶	۰/۲۳۲۹	۳/۵۹۳۱	۲/۳۳



شکل ۵ تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیوارەهای گرم و سرد

شکل (۶) تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی روی دیوارەهای آدیاباتیک محفظه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب صدور، شار حرارتی تابشی روی سطوح دیوارەهای آدیاباتیک افزایش می‌یابد، بنابراین با توجه به رابطه مستقیم شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابشی، نرخ تولید انتروپی تابشی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که شار حرارتی تابشی دیوارەهای آدیاباتیک در محل تقاطع با دیوارەهای گرم و سرد، به دلیل نزدیک شدن به دیوارەهای گرم و سرد، دچار تغییرات زیادی نسبت به قسمت میانی دیوارەهای آدیاباتیک دارد. در واقع هر چه سطوح دیوارەهای آدیاباتیک به دیواره گرم نزدیک‌تر باشد، نرخ تولید انتروپی آن کمتر است و هر چه سطوح دیوارەهای آدیاباتیک به دیواره سرد نزدیک‌تر باشد، نرخ تولید انتروپی آن بیشتر است.



شکل ۶ تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های آدیاباتیک

جدول ۵ تأثیر ضریب صدور بر نرخ تولید انتروپی

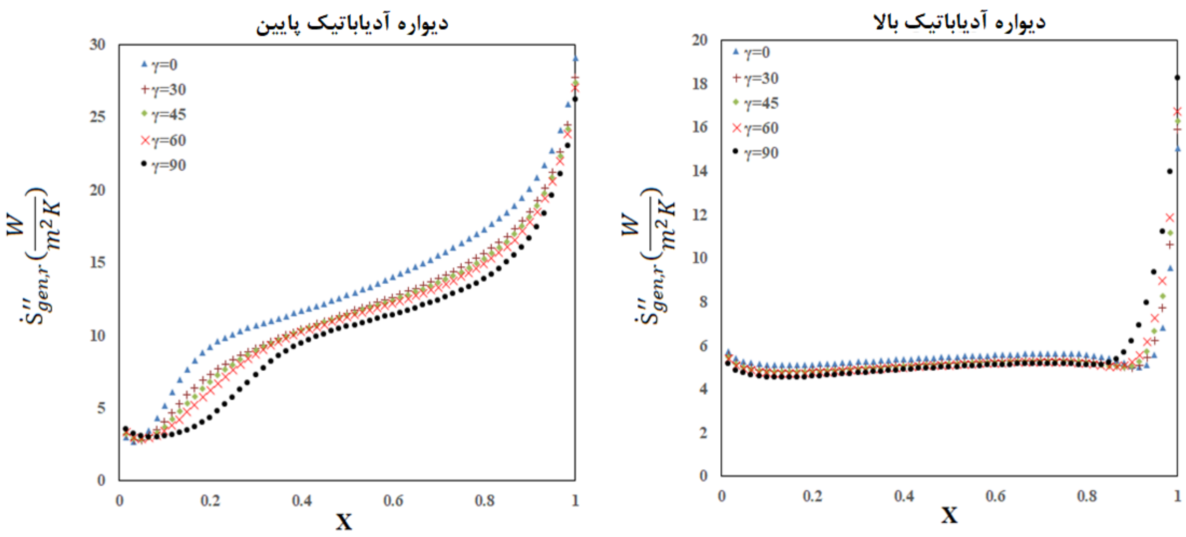
تولید انتروپی					
Ra =۱۰^۵ ، φ = ۲/۳۳					
ε	انتقال حرارت هدایت	اصطکاک سیال	تابش سطحی	انتروپی کل	**انتروپی تابش سطحی / انتروپی کل** %
۰/۱	۳/۸۷۹۱	۰/۲۴۱۲۳	۱/۸۵۸۸	۵/۶۷۷۵	٪۳۱
۰/۲	۳/۸۳۹۴	۰/۲۴۰۱۵	۳/۷۴۶۶	۷/۸۴۶۱	٪۴۸
۰/۵	۳/۷۳۲۳	۰/۲۳۷۱۴	۹/۷۴۸۵	۱۳/۷۱۷۹	٪۷۱
۰/۸	۳/۶۴۲۹	۰/۲۳۴۴۵	۱۶/۶۲۰۶	۲۰/۴۹۷۹	٪۸۱
۱/۰	۳/۵۹۳۱	۰/۲۳۲۸۸	۲۱/۹۶۶	۲۵/۷۹۲	٪۸۵

جدول (۵) نرخ تولید انتروپی همراه با تابش سطحی در عدد رایلی 10^5 و φ = ۲/۳۳ در محفظه‌ای مایل با ضریب صدور مختلف نشان می‌دهد. با افزایش ضریب صدور سهم تابش سطحی در تولید انتروپی افزایش می‌یابد. حداقل ۳۱٪ از تولید انتروپی کل در ε= ۰/۱ و حداکثر ۸۵٪ از تولید انتروپی کل در ε= ۱، متعلق به تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد. با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال، کاهش ناچیز و نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش چشم‌گیری می‌یابند. با افزایش ضریب صدور، درصد سهم تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد به طوری که غالب تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد. بنابراین نمی‌توان از تابش سطحی در محاسبات چشم‌پوشی کرد. در جدول (۶) نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی روی سطوح محفظه مایل ۴۵ درجه در عدد رایلی 10^5 و φ = ۲/۳۳ ارائه شده است. با افزایش ضریب صدور، تولید انتروپی روی تمام سطوح محفظه افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ تولید انتروپی تابشی مربوط به دیواره سرد و کمترین تولید انتروپی روی سطح آدیاباتیک بالایی می‌باشد. تابش سطحی باعث افزایش تولید انتروپی و عدم تقارن انتروپی در محفظه می‌گردد. نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی روی همه دیواره‌های محفظه مثبت می‌باشد و غالب تولید انتروپی روی دیواره سرد به دلیل اختلاف دما با دیواره گرم را دارد.

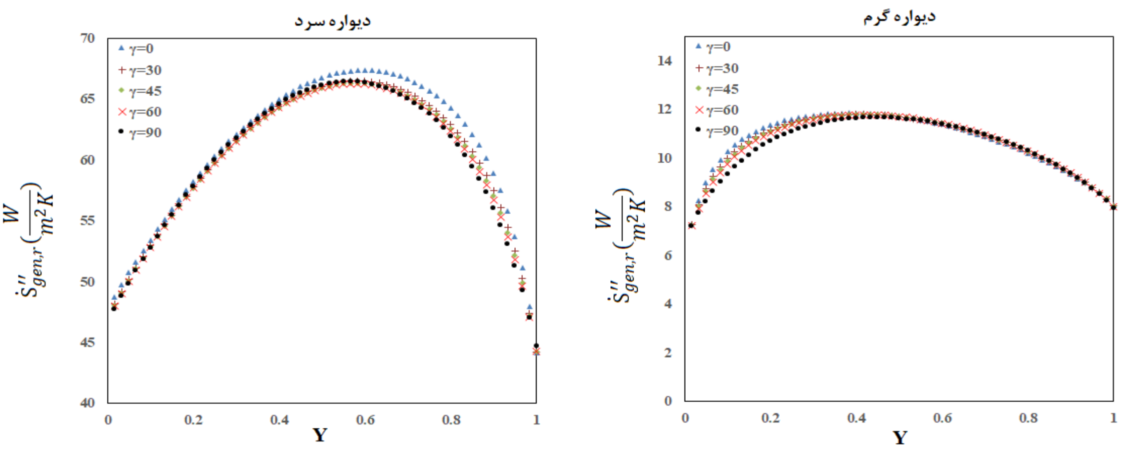
تأثیر زاویه محفظه بر تولید انتروپی تابش سطحی . در این بخش تأثیر زاویه‌های مختلف محفظه بر تولید انتروپی بررسی می‌گردد. شکل (7) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابشی سطحی روی دیواره‌های آدیاباتیک بالا و پایین و شکل (۸) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابشی سطحی روی دیواره‌های سرد و گرم نشان می‌دهد. کمترین نرخ تولید انتروپی مربوط به سطح دیواره گرم و دیواره آدیاباتیک بالا می‌باشد و بیشترین نرخ تولید انتروپی مربوط به دیواره سرد می‌باشد. نمودار نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی دیواره‌های دما ثابت به صورت گنبدی شکل می‌باشد یعنی یک نقطه ماکزیمم دارند که دیواره سرد کمی بعد از مرکز دیواره و دیواره گرم کمی قبل از مرکز دیواره، بیشترین نرخ تولید انتروپی روی دیواره را دارند ولی دیواره‌های آدیاباتیک یک روند صعودی را دارند و در میانه دیواره، شیب افزایش انتروپی کاهش می‌یابد و در گوشه‌های به دلیل برخورد با دیواره‌های سرد و گرم، افزایش نرخ تولید انتروپی تابشی با شیب بیشتری همراه می‌گردد. با افزایش زاویه محفظه، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین نرخ تولید انتروپی در زاویه ۹۰ درجه، حالتی که دیواره گرم، دیواره پایینی محفظه و دیواره سرد، دیواره بالایی محفظه می‌باشد، اتفاق می‌افتد.

جدول ۶ نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره‌های محفظه

تولید انتروپی				
Ra =10^5 ، φ = ۲/۳۳				
گرم	آدیاباتیک بالا	سرد	آدیاباتیک پایین	ε
۰/۲۳۳۰۳	۰/۰۸۳۹۸۶	۱/۱۴۰۷	۰/۴۰۱۰۲	۰/۱
۰/۴۶۱۹۵	۰/۱۶۳۷۳	۲/۳۴۹۹	۰/۷۷۱۰۲	۰/۲
۱/۱۴۳۶	۰/۴۲۵۰۸	۶/۴۶۸۶	۱/۷۱۱۳	۰/۵
۱/۸۹۷۷	۰/۸۲۸۶۶	۱۱/۴۵۱۹	۲/۴۴۲۴	۰/۸
۲/۶۵۵۸	۱/۳۶۵۶	۱۵/۰۳۲۱	۲/۹۱۲۶	۱/۰



شکل ۷ تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های آدیاباتیک



شکل ۸ تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های گرم و سرد

نتیجه گیری

تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی در یک محفظه مایل دو بعدی با دو دیواره دما ثابت و دو دیواره آدیاباتیک انجام گردید. نرخ انتروپی تابش سطحی شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده می‌باشد. در این مطالعه با توسعه روش تابش خالص، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی محاسبه گردید. همچنین تأثیر ضریب صدور و زاویه محفظه بر تولید انتروپی تابش سطحی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان می‌دهد، وجود تابش سطحی در محفظه باعث عدم تقارن توزیع نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال می‌گردد و با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت سیال کاهش و نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ تولید انتروپی تابش سطحی، بر روی دیواره سرد متمرکز شده است. افزایش اختلاف دمای دیواره گرم و سرد، صرف نظر از انتقال حرارت تابشی، تولید انتروپی در محفظه را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش عدد رایلی، تولید انتروپی در محفظه افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد. کمترین نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره آدیاباتیک بالایی و بیشترین نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره سرد اتفاق می‌افتد. نرخ تولید

انتروپی تابشی بر روی دیواره‌های دما ثابت شامل یک نقطه ماکزیمم می‌باشد ولی دیواره‌های آدیاباتیک با نزدیک شدن به دیواره سرد، باعث افزایش نرخ تولید انتروپی تابشی و با نزدیک شدن به دیواره گرم، باعث کاهش نرخ تولید انتروپی می‌گردد.

با افزایش زاویه محفظه تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین تولید انتروپی در زاویه۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. به طور کلی در این مطالعه با گسترش روش تابش خالص، تأثیر تابش سطحی بر تولید انتروپی و تأثیر مؤلفه‌های تشکیل دهنده تولید انتروپی تابش سطحی یعنی تابش در میدان و در ماده بررسی و مشاهده گردید که تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی ۸۵٪ از نرخ تولید انتروپی کل در محفظه را تشکیل می‌دهد به طوری که اختلاف تولید انتروپی با تابش سطحی و بدون آن در محفظه، بسیار قابل ملاحظه می‌باشد. بنابراین نمی‌توان در مسائل انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابشی از تابش سطحی چشم‌پوشی نمود.

فهرست علائم

F_{kj}	ضریب شکل المان k ام به j ام
g	شتاب گرانش، m/s^2
L	پهنا و ارتفاع محفظه، m
k_f	هدایت حرارتی سیال، W/mK
N	تعداد کل المان‌های سطح داخلی محفظه
N_r	عدد بی‌بعد تابش- رسانش
P	فشار، N/m^2
Pr	عدد پرانتل
r	بردار مکان
s	بردار جهت
q	شار حرارتی، W/m^2
q_r	شار حرارت تابش خالص سطح، W/m^2
G	شار حرارتی تابش ورودی، W/m^2
Q_r	شار حرارت تابش خالص بی‌بعد سطح
Ra	عدد رایلی
$\dot{S}$	نرخ انتروپی سیستم ، W/K
$\dot{S}'''_{gen,f}$	نرخ تولید انتروپی ناشی از اصطکاک بر واحد حجم، W/m^3K
$\dot{S}'''_{gen,c}$	نرخ تولید انتروپی ناشی از هدایت سیال بر واحد حجم، W/m^3K
$\dot{S}''_{gen,r}$	نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی بر واحد سطح، W/m^2K
$\dot{S}''_{r.f}$	نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در میدان بر واحد سطح، W/m^2K
$\dot{S}''_{M}$	نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در ماده بر واحد سطح، W/m^2K
$\dot{S}_{gen}$	نرخ تولید انتروپی کل، W/K
c	سرعت نور در خلأ، m/s
h	ثابت پلانک، J s
I	شدت تابش، $W/m^2\,sr$
k_B	ثابت بولتزمن، J/K
$\hat{n}$	نرمال سطح
T	دما، K
L_λ	شدت انتروپی تابشی طیفی، $W/m^2K\mu m sr$
T_c	دما دیواره سرد، K
T_h	دما دیواره گرم، K
u,v	مؤلفه‌های سرعت، m/s

علائم یونانی

α	پخش حرارتی، m^2/s
β	ضریب انبساط حرارتی حجمی، 1/K
δ	دلتای کرونکر
ε	ضریب صدور سطح داخلی
θ	دمای بی‌بعد
μ	لزجت دینامیکی، kg/ms
ϑ	لزجت سینماتیکی، m^2/s
ρ	چگالی سیال، kg/m^3
σ	ثابت استفان-بولتزمن، W/m^2K^4
ψ	تابع جریان، m^2/s
Ψ	تابع جریان بی‌بعد
ω	ورتیسیتی ، 1/s
Ω	ورتیسیتی بی‌بعد

λ	طول موج، m
φ	نسبت دمای بی بعد سطح محفظه
Ω	زاویه فضایی، sr

زیرنویس‌ها

in	ورودی
out	خروجی
c	دیواره سرد
h	دیواره گرم
M	ماده (دیواره)
r.f.	میدان تابشی
r	انتقال حرارت تابشی
gen	تولید انتروپی کل
gen,c	تولید انتروپی ناشی از هدایت سیال
gen,f	تولید انتروپی ناشی از اصطکاک
gen,r	تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی

واژه نامه

Ecologie	بوم‌شناسی
Momentum	مومنتوم
Element	المان
Adiabatic	عایق
Entropy	انتروپی
Vorticity	گردابی
Nusselt	عدد ناسلت
Rayleigh	عدد رایلی
Boussinesq	تقریب بوزینسک

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] H. F. Oztop, K. Al-Salem, "A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, Pp. 911-920, (2012). https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.012

[2] C. Balaji, S. P. Venkateshan, "Interaction of Surface Radiation with Free Convection in a Square Cavity", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 14, no. 3, Pp. 260-267, (1993). https://doi.org/10.1016/0142-727X(93)90057-T

[3] M. Akiyama, Q. P. Chong, "Numerical Analysis of Natural Convection with Surface Radiation in a Square Enclosure", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 32, no. 4, Pp. 419-433, (1997). https://doi.org/10.1080/10407789708913899.

[4] S. Z. Shuja, B. S. Yilbas, and M. O. Budair, "Natural Convection in a Square Cavity with a Heat Generating Body: Entropy Consideration," *Heat and Mass Transfer, journal article*. vol. 36, no. 4, Pp. 343-350, (2000). https://doi.org/10.1007/s002310000075

[5] L. Berrin Erbay, Z. Altaç and B. Sülüş, "Entropy Generation in a Square Enclosure with Partial Heating from a Vertical Lateral Wall", *Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 12, Pp. 909-918, (2004). https://doi.org/10.1007/s00231-003-0497-x

[6] Y. Varol, H. F. Oztop and A. Koca, "Entropy Generation due to Conjugate Natural Convection in Enclosures Bounded by Vertical Solid Walls with Different Thicknesses" *International Communications in Heat and Mass*

Transfer, vol.35, no. 5, Pp. 648-656 ,(2008). https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.01.010

[7] G. G. Ilis, M. Mobedi, and B. Sunden, "Effect of Aspect Ratio on Entropy Generation in a Rectangular Cavity with Differentially Heated Vertical Walls", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 6, Pp. 696-703, (2008). https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.02.002

[8] R. D. C. Oliveski, R, M. H. Macagnan and J. B. Copetti, "Entropy Generation and Natural Convection in Rectangular Cavities", Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 8, Pp. 1417-1425, (2009). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.012.

[9] M. Alipanah, P. Hasannasab, S. F. Hosseinizadeh and M. Darbandi, "Entropy Generation for Compressible Natural Convection with High Gradient Temperature in a Square Cavity", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.37, no. 9, Pp. 1388-1395, (2010). https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.020

[10] M. Bouabid, M. Magherbi, N. Hidouri and A. B. Brahim, A, "Entropy Generation at Natural Convection in an Inclined Rectangular Cavity", *Entropy*, vol.13, no. 5, Pp. 1020-1033, (2011).https://doi.org/10.3390/e13051020

[11] N. S. Bondareva, M. A. Sheremet, H. F. Oztop, and N. Abu-Hamdeh, "Entropy Generation due to Natural Convection of a Nanofluid in a Partially Open Triangular Cavity," *Advanced Powder Technology*, vol.28, no. 1, Pp. 244-255, (2017) .https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.09.030

[12] C. C. Cho, "Heat Transfer and Entropy Generation of Mixed Convection Flow in Cu-water Nanofluid-filled Lid-driven Cavity with Wavy Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.119, Pp. 163-174 , (2018).https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.090

[13] S. M. Seyyedi, A. S. Dogonchi, M. Hashemi-Tilehnoee, M. Waqas and D. D. Ganji, D. D., "Investigation of Entropy Generation in a Square Inclined Cavity Using Control Volume Finite Element Method with Aided Quadratic Lagrange Interpolation Functions", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.110, P. 104398, (2020) . https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104398

[14] B. Iftikhar ,T. Javed and M. A. Siddiqu, "Entropy Generation Analysis During MHD Mixed Convection Flow of Non-Newtonian Fluid Saturated Inside the Square Cavity", *Journal of Computational Science*, vol.66, P. 101907, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jocs.2022.101907

[15] S. Amraqui, A. Mezrhab, and C. Abid, "Combined Natural Convection and Surface Radiation in Solar Collector Equipped with Partitions", *Applied Solar Energy*, vol.47, no. 1, Pp. 36-47, (2011). https://doi.org/10.3103/S0003701X11010051

[16] M. A. Dashti and A. Safavinejad, "Optimal Design with Entropy Generation Minimization Approach in Combined Natural Convection with Surface Radiation in a Two- dimensional Enclosure", *Heat Transfer—Asian Research*, vol.48, no. 8, Pp. 4049-4073,(2019). https://doi.org/10.1002/htj.21582.

[17] J.F. Hinojosa, D. Buentello, J. Xamán and M. Pérez-Tello, "The Effect of Surface Thermal Radiation on Entropy Generation in an Open Cavity with Natural Convection", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.81, Pp. 164-17, (2017). https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.12.018

[18] P. Sadeghi and A. Safavinejad, "Radiative entropy generation in a gray absorbing, emitting, and scattering planar medium at radiative equilibrium", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol.201, Pp. 17-

29, (2017). https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.023

[19] A. Bejan, Convection Heat Transfer. Wiley, (2013).

[20] M. Montiel Gonzalez, Hinojosa Palafox, J., and Estrada, C. A., "Numerical study of heat transfer by natural convection and surface thermal radiation in an open cavity receiver," *Solar Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1118-1128, (2012). https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.005

[21] J. R. Howell, M. P. Menguc and R. Siegel, Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition.CRC Press , (2010). https://doi.org/10.1201/9780429327308

[22] A. Aejan, Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-size Systems and Finite-time Processes. CRC press, (2013). https://doi.org/10.1201/9781482239171

[23] M. Planck, The theory of heat radiation. Blakiston, (1914).

[24] L. Liu, S. Chu, "Verification of Numerical Simulation Method for Entropy Generation of Radiation Heat Transfer in Semitransparent Medium," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol.103, no. 1, Pp. 43-56, (2007). https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2006.07.004

[25] G. de Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Bench Mark Numerical Solution", International *Journal for Mumerical Methods in Fluids*, vol.3, no. 3, Pp. 249-264, (1983).

[26] M. Behnia, J. Reizes and G. de Vahl Davis, "Combined Radiation and Natural Convection in a Rectangular Cavity with a Transparent Wall and Containing a Non- participating Fluid", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol.10, no. 3, Pp. 305-325, (1990). https://doi.org/10.1002/fld.1650100306

[27] S. G. Martyushev and M. A. Sheremet, "Numerical Analysis of Conjugate Natural Convection and Surface Radiation in an Enclosure with Local Heat Source" *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, vol.5, no. 1, (2013). https:// doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2012006040